

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การพัฒนายานพาหนะไฟฟ้าโดยใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งจ่ายพลังงานช่วงชะลอเบรกและช่วงเบรกผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนตามขั้นตอนดังนี้

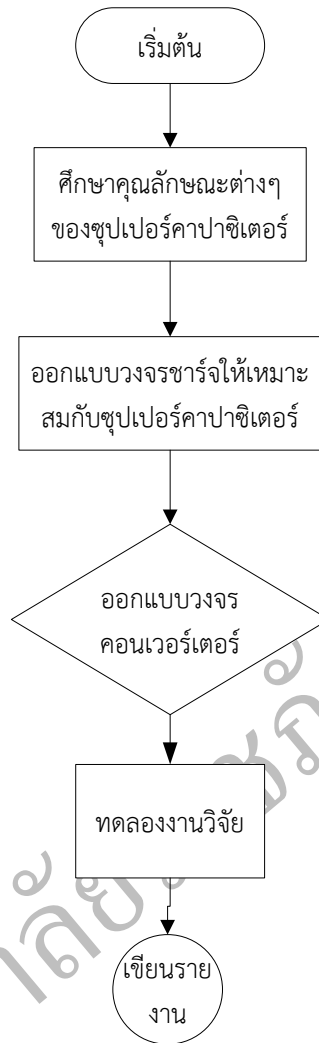
1. แบบแผนการวิจัย
2. การออกแบบระบบขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า
3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
4. การวิเคราะห์ข้อมูล

แบบแผนงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) เป็นการศึกษาพฤติกรรมการเก็บพลังงานและคายพลังงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ศึกษาพฤติกรรมการเก็บพลังงานในช่วงชะลอเบรกและช่วงเบรกและหาประสิทธิภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนยานพาหนะได้ทำการทดลองช่วงเดือนพฤศจิกายน 2561 - มกราคม 2562 โดยทำการทดลองผู้วิจัยจะดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังนี้

การดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงกระบวนการได้ดังภาพที่ 3.1 แสดงขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย สามารถอธิบายการดำเนินงานวิจัยได้ดังนี้

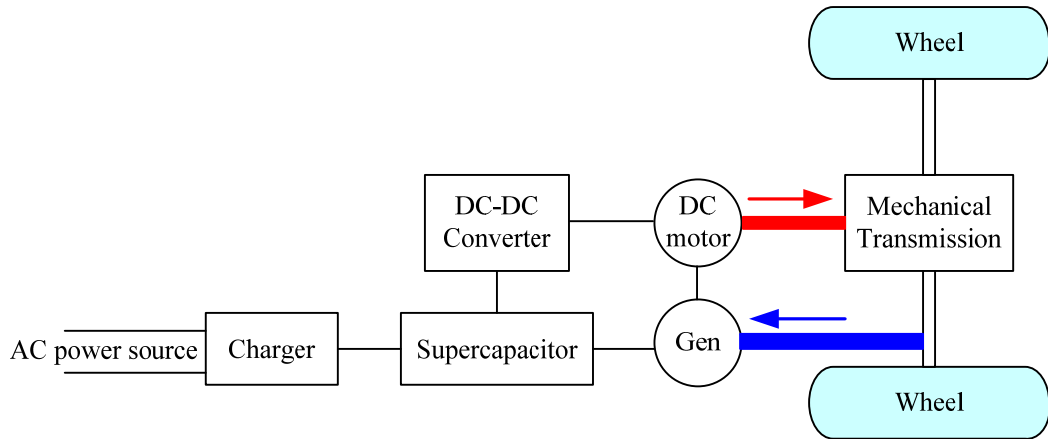
1. ศึกษาคุณลักษณะของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ 3000 F , 2.7 V ต่ออนุกรมได้ 165F, 48V จำนวน 2 ลูก รวมเป็น 330 F, 48 V ที่ใช้ในงานวิจัยและเก็บข้อมูลการชาร์จและดิสชาร์จให้กับยานพาหนะไฟฟ้า
2. ออกแบบระบบวงจรชาร์จ (สถานีชาร์จ) ทดลองและเก็บข้อมูลการชาร์จและดิสชาร์จของซูเปอร์คาปาซิเตอร์
3. ออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงจรพัลส์ควบคุมเพื่อให้สามารถปรับกระแส และจ่ายกระแสได้ต่อเนื่อง
4. ทดลองใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาด 330 F, 48 V ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าน้ำหนัก 490 กิโลกรัม (รวมน้ำหนักผู้โดยสาร) วิ่งไป กลับระหว่างอาคารวิทยาศาสตร์และอาคารหอสมุด
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลอง



ภาพที่ 3.1 วิธีดำเนินงานวิจัย

การออกแบบระบบขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า

การออกแบบระบบขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าในครั้งนี้ได้แสดงรูปแบบการทำงานของระบบการเก็บและจ่ายพลังงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้เป็นตัวส่งกำลังไปที่ล้อยานพาหนะไฟฟ้า และถูกต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยในช่วงเบรกหรือชะลอเบรกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเป็นตัวชาร์จพลังงานไฟฟ้าให้กับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างการออกแบบระบบขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า

1. ออกแบบขนาดความจุซูเปอร์คาปาซิเตอร์

การออกแบบหาขนาดความจุซูเปอร์คาปาซิเตอร์ให้สามารถใช้กับรถกอล์ฟ ขนาด 4 นั่ง น้ำหนักรถ 290 กิโลกรัม น้ำหนักบรรทุกทั้งหมด 400 กิโลกรัม เพื่อนำมาใช้วิ่งระหว่างอาคารเรียนรวม 4 ถึงอาคารหอสมุด มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ ซึ่งมีระยะทาง 505 เมตร ต่อเที่ยว และระยะทางไป กลับรวม 1010 เมตร โดยสามารถนำข้อมูลมาคำนวณหาขนาดของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า (รถกอล์ฟ) ให้สามารถวิ่งได้มากกว่า 505 เมตร ได้ดังนี้ จากสูตรพลังงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์

$$E = \frac{1}{2} \times C \times V^2 \quad (3.1)$$

เมื่อ E คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า หน่วยเป็น จูล (J)
 C คือ ความจุ หน่วยเป็น ฟารัด (F)
 V คือ แรงดันไฟฟ้า หน่วยเป็น โวลต์ (V)

โดยเลือกใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ขนาด 165 F, 48Vdc จำนวน 2 ลูก ได้ความจุทั้งหมดเป็น 330F 48Vdc จำนวน 1 ชุด

2. เวลาที่ยานพาหนะไฟฟ้าสามารถวิ่งได้

จากสูตรพลังงาน (W) ของซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถนำไปหาค่าเวลา (t) ที่ใช้ขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าได้ดังนี้

$$E = \frac{\frac{1}{2} \times C \times V^2}{3,600}$$

$$E = \frac{\frac{1}{2} \times 330 \times 48^2}{3,600} = 380,160 \text{ Joule}$$

จากสูตรปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้า

$$P = \frac{E}{t} \quad (3.2)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า มีหน่วยเป็น จูลต่อวินาที (J/s)

$$1 \text{ วัตต์ (W)} = 1 \text{ จูลต่อวินาที (J/s)}$$

เมื่อขนาดพิกัดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง P = 2000 kW

หาเวลาที่รถกอล์ฟสามารถวิ่งได้

$$t = \frac{380160}{2000} = 159.25 \text{ sec}$$

เวลาที่รถกอล์ฟสามารถวิ่งได้ 190.08 วินาที (3 นาที 10 วินาที)

3. ระยะทางที่ยานพาหนะไฟฟ้าสามารถวิ่งได้

จากเส้นรอบวงหรือวงล้อของรถกอล์ฟมีระยะ 3.7 เมตร/รอบ ความเร็วยานพาหนะไฟฟ้าเท่ากับ 12 กิโลเมตร/ชั่วโมง หรือ 54 รอบ/นาที หาระยะทางการวิ่งต่อนาทีจะได้

$$\text{รอบ/นาที} = \frac{12\text{km}}{60\text{min}} = 200 \text{ เมตร/นาที}$$

จากการคำนวณแหล่งจ่ายไฟกับระยะทาง จะได้ระยะทางที่คาปาซิเตอร์ใช้งานต่อ 1 ชุด ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ระยะทางที่วิ่งได้} &= \text{รอบ/นาที (rpm)} \times \text{เวลาใช้งานคาปาซิเตอร์ (min)} \\ &= 200 \text{ (rpm)} \times 3.168 \text{ min} = 633.6 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นจากการใช้งานซูเปอร์คาปาซิเตอร์ 1 ชุด ขนาด 330 ฟารัด 48 โวลต์ ยานพาหนะไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ระยะทาง 633.6 เมตร

4. คำนวณหาเวลาที่ใช้ชาร์จ

เนื่องจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถชาร์จที่ปริมาณกระแสสูงได้และชาร์จที่แรงดันไฟฟ้าตามพิกัดซึ่งสามารถหาเวลาและกระแสที่ใช้ชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ได้ดังสมการที่ 3.3

$$t = (C/I) \quad (3.3)$$

เมื่อ t คือ เวลา หน่วยเป็น (วินาที)

- C คือ ปริมาณความจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ หน่วยเป็น (แอมแปร์/วินาที)
I คือ กระแสชาร์จหน่วยเป็น (แอมแปร์)

กำหนดให้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีปริมาณความจุ 330 ฟารัด 48 โวลต์ กระแสสูงสุดของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ 1900 แอมแปร์ ถ้าต้องการชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์แบบปกติ (Standard Charge) จะได้ กระแสและเวลาที่ใช้ชาร์จดังตารางที่ 3.1

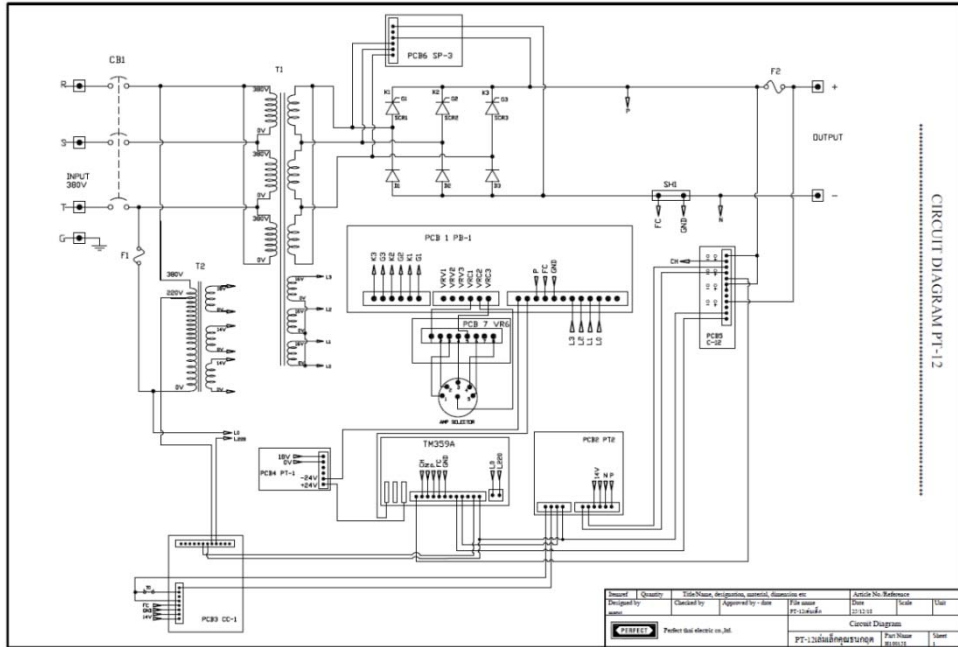
ตารางที่ 3.1 กระแสและเวลาในการชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์

กระแสชาร์จ (A)	เปอร์เซ็นต์การชาร์จ (%)	เวลาที่ใช้ชาร์จ (sec)
1900	100	1
950	50	2
100	5.26	19
90	4.74	21
80	4.21	23.75
70	3.68	27.14
60	3.16	32
50	2.63	38
40	2.10	47.50
30	1.57	63.33
20	1.05	95
10	0.53	190

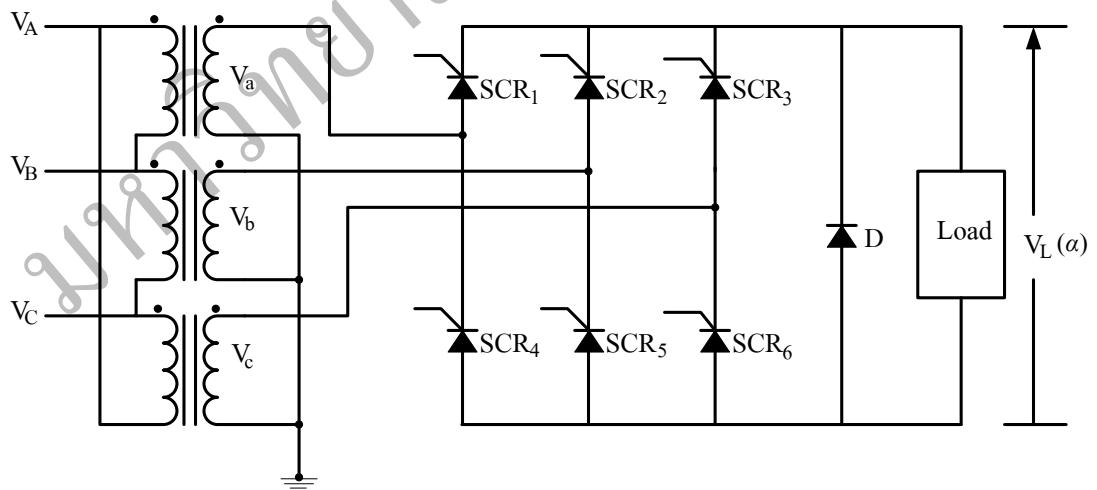
5. การออกแบบวงจรชาร์จปริมาณกระแสสูง

การออกแบบวงจรชาร์จกระแสสูงแสดงดังภาพที่ 3.3 โดยเป็นการออกแบบวงจรควบคุมเฟสจะเป็นการควบคุมวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์เต็มคลื่นสามเฟส (Three phase full bridge controlled rectifiers) การควบคุมแบบเต็มคลื่นในระบบไฟสามเฟสมีหลักการทำงานเหมือนกับการควบคุมครึ่งคลื่นในระบบไฟหนึ่งเฟส โดยเอสซีอาร์ตัวที่ 1-3 จะมีขาแคโทดต่อรวมกันไปยังโหลดและแอนโอดต่อเข้ากับแหล่งจ่ายของแต่ละเฟสดังแสดงในภาพที่ 3.4 ส่วนเอสซีอาร์ตัวที่ 4-6 ขาแอนโอดต่อรวมกันไปยังโหลด ส่วนขาแคโทดต่อเข้ากับแหล่งจ่ายของแต่ละเฟส และจะนำกระแสได้ เมื่อแรงดันในเฟสนั้นอยู่ในช่วงวัฏจักรบวกและมีพัลส์จุดชนวนเข้าขาเกตเอสซีอาร์ พัลส์ที่ใช้จุดชนวนเอสซีอาร์แต่ละตัวจะต่างเฟสกันเป็นมุม 60 องศา ดังนั้นเอสซีอาร์จึงนำกระแสได้ไม่เกิน 60 องศา และเรียงตามลำดับเฟสของแหล่งจ่าย โหลดจึงได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแต่ละเฟสเท่าๆ กันจากระบบไฟ

สามเฟสการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดทำได้โดยการปรับมุมจุดชนวนของพัลส์ที่ป้อนให้กับขาเกตของเอสซีอาร์



ภาพที่ 3.3 วงจรชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์ปริมาณกระแสสูง



ภาพที่ 3.4 วงจรควบคุมเต็มคลื่นสามเฟส

พิจารณาวงจรคอนเวอเตอร์ภาพที่ 3.4 และภาพที่ 3.5 มุมจุดชนวน α ของพัลส์ที่ป้อนเกตเอสซีอาร์เท่ากับ 30 องศาเริ่มต้นพิจารณาที่เฟส a ซึ่งมี SCR₁ ต่ออยู่ SCR₁ เริ่มนำกระแสที่มุม $\alpha = 30$ องศา กระแสจากเฟส a จึงไหลผ่าน SCR₁ ผ่านโหลด ไปยัง SCR₅ รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดจะเหมือนกับรูปคลื่นแรงดันของเฟส a เพียงแต่ว่าพื้นที่ใต้รูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่ายถูกตัดในช่วงแรก

ก่อนที่ SCR₁ กับ SCR₅ จะนำกระแสสำหรับการนำกระแสของ SCR₂ ในเฟส b ก็เหมือนกับการทำงานของ SCR₁ เพียงแต่ล่าหลังรูปคลื่นเฟส a เป็นมุม 120 องศา และในทำนองเดียวกันการนำกระแสของ SCR₃ ในเฟส c ล่าหลังรูปคลื่นเฟส b เป็นมุม 120 องศา ตามลำดับเฟสของแหล่งจ่าย ดังนั้นรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโพลต์ในแต่ละช่วงจึงเหมือนกับรูปคลื่นแรงดันของเฟส a b และ c ตามช่วงการนำกระแสของ SCR₁ - SCR₅, SCR₂ - SCR₆ และ SCR₃ - SCR₄ ตามลำดับ

เมื่อปรับมุมจุดชนวน α ระหว่าง $0 \leq \alpha \leq 30$ องศา กระแสไหลต่อเนื่อง เอสซีอาร์แต่ละตัวนำกระแส 60 องศา ถ้ามุมจุดชนวนอยู่ระหว่าง $60 \leq \alpha \leq 120$ องศา กระแสไหลต่อเนื่องเอสซีอาร์แต่ละตัวนำกระแสน้อยกว่า 60 องศา สมการแรงดันเฉลี่ยตกคร่อมโพลต์คือ

เมื่อ $0 \leq \alpha \leq 30$ องศา (กระแสไหลต่อเนื่อง)

$$\begin{aligned} V_L(\alpha) &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3+\alpha}^{2\pi/3+\alpha} V_m \sin \omega t \, d\omega t \\ &= \frac{3}{\pi} V_m \cdot [-\cos \omega t]_{\pi/3+\alpha}^{2\pi/3+\alpha} \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_s \cdot [\cos(\frac{\pi}{3} + \alpha) - \cos(\frac{2\pi}{3} + \alpha)] \\ &= \frac{3\sqrt{2}V_s}{\pi} [\cos \frac{\pi}{3} \cdot \cos \alpha - \sin \frac{\pi}{3} \cdot \sin \alpha - \cos \frac{2\pi}{3} \cdot \cos \alpha + \sin \frac{2\pi}{3} \cdot \sin \alpha] \\ V_L(\alpha) &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} (V_{L-L}) \cos \alpha \end{aligned} \quad (3.4)$$

เมื่อ $0 \leq \alpha \leq 60$ องศา (กระแสไหลต่อเนื่อง)

สมการแรงดันเฉลี่ยคร่อมโพลต์ คือ

$$\begin{aligned} V_L(\alpha) &= \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3+\alpha}^{2\pi/3+\alpha} V_m \sin \omega t \, d\omega t \\ &= \frac{3}{\pi} V_m \cdot [-\cos \omega t]_{\pi/3+\alpha}^{2\pi/3+\alpha} \\ V_L(\alpha) &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_s \cdot \cos \alpha \end{aligned}$$

$$V_L(\alpha) = \frac{3}{\sqrt{2}\pi} (V_{L-L}) \cos \alpha \quad (3.5)$$

เมื่อ $60 \leq \alpha \leq 120$ องศา (กระแสไหลไม่ต่อเนื่อง)

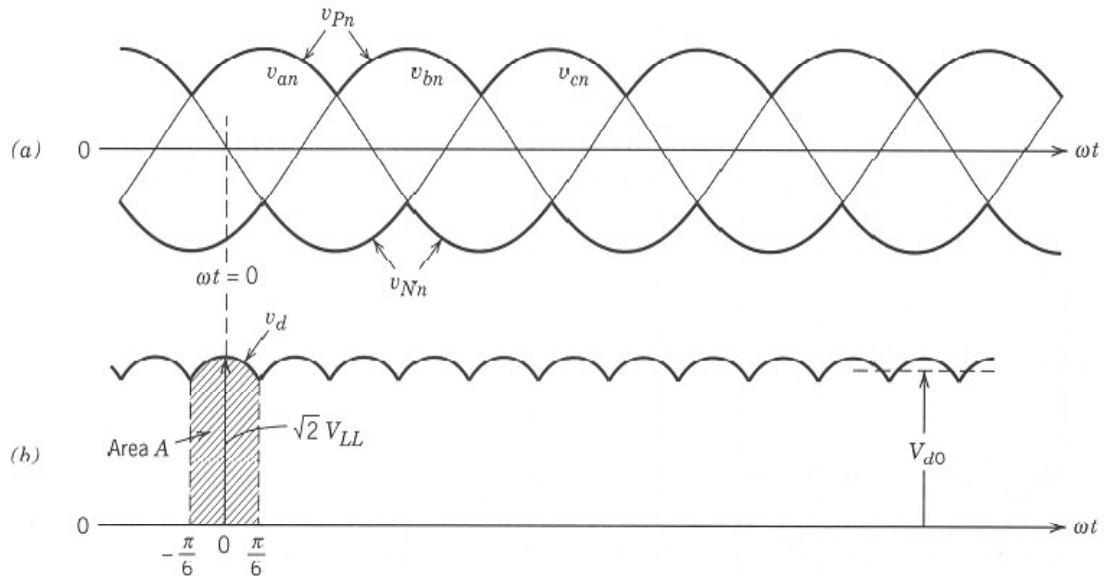
$$V_L(\alpha) = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/3+\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t \, d\omega t$$

$$V_L(\alpha) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} (V_{L-L}) [1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \alpha)] \quad (3.6)$$

กำหนดให้ V_{L-L} คือ แรงดัน rms ของแหล่งจ่ายระหว่าง line กับ line

จากสมการแรงดันเฉลี่ยคร่อมโพลต์ RL นี้จะเห็นว่าเมื่อปรับมุมจุดชนวน $\alpha = 0$ องศา แรงดันคร่อมโพลต์มีค่าสูงสุดและ $\alpha = 90$ องศา แรงดันเฉลี่ยคร่อมโพลต์เป็นศูนย์ ดังนั้นการควบคุม

มุมจุดชนวน α ระหว่าง $0 - 90$ องศา เป็นช่วงเร็กตีไฟเออร์หรือเป็นการแปลงแรงดันกระแสสลับเป็นแรงดันกระแสตรงจ่ายให้กับโหลด



ภาพที่ 3.5 รูปคลื่นแรงดันคร่อมโหนด และกระแสโหนด เมื่อต่อไดโอด fly - wheel คร่อมโหนด เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทดลองการประจุและคายประจุให้กับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ทดลองการประจุและคายประจุโดยต่อซูเปอร์คาปาซิเตอร์และทดลองจ่ายพลังงาน (คายประจุ) ให้กับอิเล็กทรอนิกส์โหนดโดยมีเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยดังนี้

1. ซูเปอร์คาปาซิเตอร์

การศึกษาการประจุและคายประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยซูเปอร์คาปาซิเตอร์ยี่ห้อ Maxwell รุ่น BMOD0165P048 BXX 165F, 48V จำนวน 2 ลูก ต่อขนานจะได้เป็นขนาดพิกัดรวมเป็น 330 F, 48 V จำนวน 1 ชุด อายุการใช้งาน 10 ปี หรือ 1,000,0000 วัฏจักร แสดงดังภาพที่ 3.6 โดยมีคุณลักษณะที่มีความหนาแน่นกำลังงานสูงมีข้อจำกัดในเรื่องแรงดันในการประจุไม่เกิน 51 โวลต์



(ก) ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดพิกัด 165F, 48V



(ข) การต่อขนานซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขนาดพิกัดรวม 330 F, 48 V

ภาพที่ 3.6 การต่อขนานซูเปอร์คาปาซิเตอร์

2. แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรดแบบ Sealed Lead Acid Battery ยี่ห้อ TROJAN รุ่น T-1275 ขนาด 12V, 150A อายุการใช้งาน 1-2 ปี หรือ 500-600 วัฏจักร แสดงดังภาพที่ 3.7 โดยมีคุณลักษณะที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูงมีข้อจำกัดในเรื่องกระแสในการประจุ cycle usage

แบตเตอรี่รถกอล์ฟ TROJAN T-875



ภาพที่ 3.7 แบตเตอรี่ยี่ห้อ TROJAN รุ่น T-1275 ขนาด 12V, 150A

3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงยี่ห้อKEYSIGHT DC Power Supply รุ่น N8952Aเป็นแหล่งจ่ายในการทดลองโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ตั้งแต่ 0-200V กระแสสูงสุด210A กำลังไฟฟ้า 15000Wโดยสามารถเลือกพิกัดแรงดันและกระแสในการทดลองได้ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

4. อุปกรณ์บันทึกข้อมูล

อุปกรณ์เก็บข้อมูล AGILENT 34970a BENCHLINK DATA LOGGER ใช้ในการบันทึกค่าแรงดันและกระแสในการทดลองการประจุและคายประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์และแบตเตอรี่การวัดค่ากระแสจะวัดผ่านตัวต้านทานอนุกรม (Shunt Resistor) มีค่าความต้านทาน 0.001 โอห์ม



ภาพที่ 3.9 อุปกรณ์เก็บข้อมูล AGILENT 34970a BENCHLINK DATA LOGGER

5. โหลดไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์

โหลดไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์หรืออิเล็กทรอนิกส์โหลด (DC Electronic loads) รุ่น KEYSIGH N3300A SYSTEM DC Electronic Loads ขนาดพิกัด 60VDC 120ADC 7200W ใช้ในการทดลองเป็นโหลดให้กับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ทำการปล่อยประจุ



ภาพที่ 3.10 อิเล็กทรอนิกส์โหลดรุ่น KEYSIGH N3300A SYSTEM



ภาพที่ 3.11 ยานพาหนะไฟฟ้าขนาด 4 ที่นั่ง จำนวน 1 คัน

การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

1. การวิเคราะห์เครื่องอัดประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงสำหรับยานพาหนะไฟฟ้า

เวลาในการการประจุ/การปล่อยประจุ

ซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถชาร์จด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ชุดสำรองไฟกระแสตรง แบตเตอรี่ และโซลาร์เซลล์ โดยไม่ต้องคำนึงถึงระดับของกระแสในการชาร์จไฟแต่ต้องคำนึงถึงระดับของแรงดันไม่ให้เกินพิกัดของแรงดันที่ซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถทนได้ ซึ่งเวลาในการการประจุและการปล่อยประจุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.10) ถึงสมการที่ (3.12) เวลาช่วงการปล่อยประจุ สำหรับกระแสคงที่

$$t = C \times \frac{(V_0 - V_1)}{I} \quad (3.7)$$

เวลาช่วงการปล่อยประจุ สำหรับกำลังไฟฟ้าคงที่

$$t = 0.5 \times C \times \frac{(V_0^2 - V_1^2)}{P} \quad (3.8)$$

เวลาช่วงการปล่อยประจุ สำหรับความต้านทานคงที่

$$t = -C \times R \times \ln\left(\frac{V_1}{V_0}\right) \quad (3.9)$$

การวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงช่วงการประจุและปล่อยประจุเทียบกับเวลา โดยนำข้อมูลแรงดัน กระแส ที่ได้จากเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) จากการต่อร่วมซูเปอร์คาปาซิเตอร์กับยานพาหนะไฟฟ้า มาเขียนเป็นกราฟ

2. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า

โดยการนำข้อมูลแรงดัน กระแส ที่ได้จากเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) มาเขียนกราฟเพื่อวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงช่วงการประจุและปล่อยประจุเทียบกับเวลา โดยพลังงานที่สะสมในตัวการประจุหาได้จากสมการที่ 3.4

พลังงานที่สะสมในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor Energy Storage) มีหน่วยเป็นจูล หรือ วัตต์-วินาที (1 Joules or 1 Watt-second) พลังงานรวมที่ใช้ในช่วงเวลาการการประจุ (Charge) คือ

$$W_t = \int_0^t p dt = \int_0^t I v_c dt = \int_0^t (C \frac{dv}{dt}) v_c dt = C \int_0^t v dv$$

พลังงานที่สะสมในตัวการประจุคือ

$$W_c = \frac{1}{2} C V_c^2 \quad (3.10)$$

เมื่อ W_c คือ พลังงานสะสมในตัวการประจุ มีหน่วยเป็น จูล (J) หรือ วัตต์-วินาที
 C คือ ความจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)
 V_c คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตัวการประจุ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

และสามารถหาค่าพลังงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างการประจุกับการปล่อยประจุได้ดังนี้

$$\Delta W = \frac{1}{2} C (V_1^2 - V_2^2) \quad (3.11)$$

เมื่อ V_1 คือ แรงดันช่วงการประจุ (Charge Voltage)
 V_2 คือ แรงดันช่วงปล่อยประจุ (Discharge Voltage)

พลังงานที่เกิดจากความต้านทานภายในตัวการประจุหาได้จาก

$$W_R = I^2 R t \quad (3.12)$$

ประสิทธิภาพการทำงานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันและอุณหภูมิซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้ ประสิทธิภาพการประจุที่กระแสดังกล่าวคือ

$$\eta_{SC} = \frac{\sum (V_{out} \times I_{out})}{\sum (V_{in} \times I_{in})} \times 100\% \quad (3.13)$$

ส่วนประกอบของการประจุและส่วนประกอบของตัวต้านทาน R_s อนุกรมกับวงจรเรียกว่าค่าความต้านทานอนุกรมภายในตัวการประจุ (Equivalent Series Resistance or ESR) ซึ่งเป็นผลให้เกิดความร้อนในตัวการประจุ ตัวต้านทานขนาน R_p (Equivalent Parallels Resistance or EPR) เป็นผลจากกระแสรั่วไหล (Leakage Current) ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) และตัวต้านทาน R_p นี้จะทำให้เกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลาหรือเรียกว่าการปล่อยประจุในตัวเอง (Self-Discharge) ตัวการประจุ C ต่อกันอนุกรมกับความเหนี่ยวนำ L ซึ่งมีขนาดเล็กมากเป็นผลมาจากรูปทรงทางเรขาคณิตจากการผลิตตัวการประจุ

โดยค่า ESR สามารถหาได้จากการจ่ายไฟในช่วงแรงดัน (ΔV) และกระแส (ΔI) ในระหว่างการปล่อยประจุ และสามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมภายในได้ดังนี้

$$ESR = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

$$ESR = \frac{V_f - V_{\min}}{I_d} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \text{ความจุไฟฟ้า (Capacitance)} &= (I_d \times t_d)/(V_w - V_f) \\ &= (I_d \times t_d)/V_d \end{aligned} \quad (3.15)$$

- เมื่อ V_w คือ แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นในการทำงาน (V)
 V_{\min} คือ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดขณะต่อโหลด (V)
 I_d คือ กระแสช่วงการปล่อยประจุ (A)
 V_f คือ แรงดันไฟฟ้าหลังจากปลดโหลดออก 5 วินาที (V)
 t_d คือ เวลาช่วงปล่อยประจุจากแรงดันเริ่มต้นถึงแรงดันขั้นต่ำ (sec)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งานจากการต่อซูเปอร์คาปาซิเตอร์กับยานพาหนะไฟฟ้า โดยนำข้อมูลแรงดัน กระแส ที่ได้จากเครื่องบันทึกข้อมูลมาเขียนกราฟ เพื่อวิเคราะห์ถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา

3. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมในการใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์สำหรับยานพาหนะไฟฟ้า

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนยานพาหนะไฟฟ้า (Break even point electric vehicle) ผลการวิจัยพบว่าในขณะที่ซื้อรถยนต์ไฟฟ้ามีราคาสูงกว่ารถยนต์เชื้อเพลิงฟอสซิล (น้ำมัน) แต่เริ่มในปีที่สองเนื่องจากต้นทุนเชื้อเพลิงที่สูงทำให้ต้นทุนของรถยนต์ไฟฟ้ามีค่าน้อยลง ปัจจุบันจุดคุ้มทุนของยานพาหนะไฟฟ้า การหาจุดคุ้มค่าและคุ้มทุน

$$\text{การหาจุดคุ้มทุน} \quad N = \frac{F}{P - V} \quad (3.16)$$

- เมื่อ F คือ ต้นทุนคงที่
 V คือ ต้นทุนแปรผัน
 N^* คือ จำนวนที่ผลิตที่จุดคุ้มทุน
 p คือ ราคาขายต่อหน่วย

จุดคุ้มค่าและคุ้มทุนจากการใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์แทนแบตเตอรี่ ดำเนินการจากจำนวนเงินที่ลงทุนสร้างเพื่อใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ ใช้เงินลงทุนซื้อวัสดุอุปกรณ์รวมจ้างทำเป็นจำนวนเงินโดยประมาณ 89,000 บาท มีอายุการใช้งาน 10 ปี คิดเป็นเงินลงทุน 8,900 บาทต่อปี ซึ่งถือเป็นเงิน

ลงทุนและต้นทุนแปรผัน 1,000 บาท เมื่อนำไปเทียบกับแบตเตอรี่ยี่ห้อ TROJAN รุ่น T-1275 ขนาด 12V, 150A ราคา 7,800 บาทต่อลูก รวมทั้งหมด 6 ลูก เป็นเงิน 46,800 บาท มีอายุการใช้งาน 2 ปี คิดเป็นเงินลงทุน 23,400 บาทต่อปี และต้นทุนแปรผัน 1,000 บาท

$$\text{จุดคุ้มทุนใช้แบตเตอรี่ } N = \frac{F}{P - V}$$

$$F_b = N(P - V)$$

จุดคุ้มทุนใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์

$$F_{sc} = N(P - V)$$

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี